



Title	原回転機に関する研究（第1報）
Author(s)	藤田，義弘
Citation	北海道教育大学紀要．第二部．A，数学・物理学・化学・工学編，21(2) ： 39-46
Issue Date	1971-02
URL	http://s-ir.sap.hokkyodai.ac.jp/dspace/handle/123456789/5935
Rights	

原回転機に関する研究(第1報)

藤 田 義 弘

北海道教育大学札幌分校電気工学研究室

Study on the Origin of Electrical Machines

Yoshihiro FUJITA

Department of Electrical Engineering, Sapporo Branch, Hokkaido University of Education

Summary

The author presents some reports on the characteristics of the Origin of Electrical Machines, and in these reports he proposes the technical term "Origin Machine." The Origin Machine is composed of two parts: one is a stator and the other is a rotor, those are connected with two electrical sources to make a rotating magnetic field.

The Origin Machine may be considered to be one out of many patterns of rotating machines.

In this paper he tries to make the analysis of the Origin Machine, and proposes the general drawing of a vector diagram, and also discusses the general conceptions about slips, load angles, the equivalent reactance of armature reactions, etc.

1. 緒 言

表題にある原回転機とは次のごときものにつけた概念である。すなわち、回転機の固定子、回転子が、おのおの独立した電源によってつくられた回転磁界をもっており、この回転磁界は、空げきに正弦波状に分布され、かつその分布を保ちながら回転する、というものである。このような回転機は、あらゆる回転機に共通する性質をもっている。あらゆる回転機の原形と考えることができる。そこでこれを原回転機と名づけた。原回転機についての理論を求めるならば、それは回転機の一般理論の一つとなるのではないかと考え、考察を進めてみた。その結果、一般的なベクトル図の書き方、すべり、負荷角、電機子反作用等価リアクタンスの一般的概念、およびそれを用いた、固定子、回転子の入出力、機械的入出力、トルク等の計算式を得たのでそれを報告する。

2. 原回転機についての仮定

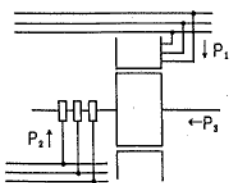


図1 原回転機略図

原回転機の理論を単純にするため、および現存機種に適用するとき便利にするため、さらに次のごとく定める。固定子、回転子は、共に3相交流を電源とする。電源の周波数はゼロより無限大にまで可変とする。巻線はリアクタンスはあるが抵抗はない。抵抗は回転機の外部にあるものとする。鉄ロス、機械ロス等のロスもないものとする。

図1は原回転機の略図である。P₁、P₂は固定子、回転子の入力、P₃は

機械的入力、矢印は正方向を示すものと定める。こうすれば次の式が成立する。

$$P_1 + P_2 + P_3 = 0 \tag{1}$$

3. 原回転機のベクトル図

原回転機のベクトル図は、固定子(以下1次という)、回転子(以下2次という)の入出力、磁界の回転のし方、電流の電圧に対するすすみ、おくれなどによって多種にわかれる。一義的にベクトル図を画くために、型を分類し、それらの対応をつくった。

1) 磁界と軸の回転の型

1次の磁極と2次の磁極とは、2次が機械的に回転することによって、常に対向しながら回転している。勿論、定常状態においてである。いまは定常状態について考える。1次、2次、および軸の角速度を $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ とすれば次式が常に成立する。角速度は右まわりを正と定める。

$$\omega_1 = \omega_2 + \omega_3 \tag{2}$$

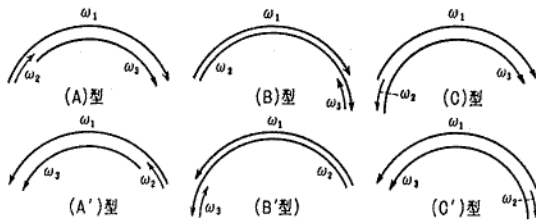


図2 磁界と軸の回転の型

そこで、磁界と軸の回転の型は、(2)を満足するように、 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ を組合わせればよく、この組合わせは、図2のごとく6種の型になり、これ以外にはない。図においては、角速度の大きさを弧の大きさで、方向を矢印で示してある。図のうち(A'), (B'), (C')は、おのおの(A), (B), (C)を反対方向からみたものであるゆえ、

1次磁界の回転方向を、右まわりにみるように原回転機をみると定めれば、磁界と軸の回転のあり方は、(A), (B), (C)の3種に限られてしまう。

2) 巻線に誘起される電圧の型

巻線に電圧が誘起されるのは、1次、2次磁界の合成磁界の回転による。1次、2次の磁束(磁界の意味も含める)を ϕ_1, ϕ_2 とすると、 ϕ_1, ϕ_2 は静止軸に対しては、同方向、等角速度 ω_1 で回転する。そこで ϕ_1, ϕ_2 の合成磁束 ϕ_0 も、やはり同方向に ω_1 で回転する。この ϕ_0 の回転が1次、

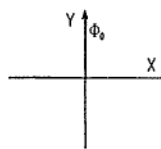


図3

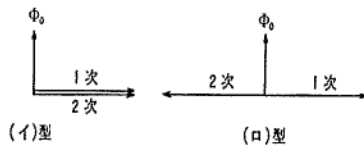


図4 巻線に誘起される電圧の型

2次巻線に電圧を誘起するのである。従来、誘導機の説明には、巻線に電圧を誘起する回転磁界は、独立して存在しているごとくになってはいるが、やはり1次、2次の合成磁界であることに変わりはない。

ベクトル図においては、図3のごとく、 ϕ_0

表1

巻線に誘起される電圧の型	(イ) $\omega_1 > \omega_3$	(ロ) $\omega_1 < \omega_3$
磁界と軸の回転の型	(A) $\omega_1 > \omega_2$	(C)
	(B) $\omega_1 < \omega_2$	

を Y 軸の正方向に画くことと定める。そうすると、巻線に誘起される電圧のベクトルは X 軸上にある。また、 ϕ_0 が右まわりのとき、1次巻線に誘起される電圧の方向は X 軸の正方向をとる、と定める。1次磁界の回転方向を右まわりにみるように原回転機をみるものと定めてあるから、 ϕ_0 の回転方向は常に右まわりとなり、1

次巻線に誘起される電圧の方向は、常に X 軸の正方向をとることになる。2次巻線に誘起される電圧の方向は、図2の(A), (B)型するとき X 軸の正方向をむき、(C)型するとき負方向をむく。なお、(A), (B)型においては、 $\omega_1 > \omega_3$ であり、(C)型においては、 $\omega_1 < \omega_3$ である。

このようにして、1次、2次巻線に誘起される電圧の型は、図4の(イ), (ロ)の2種に限られて

しまし、巻線に誘起される電圧の型と、磁界と軸の回転の型とを対応させると、表1のごとくなる。

3) 巻線に電流を流す電圧の X 軸成分の型

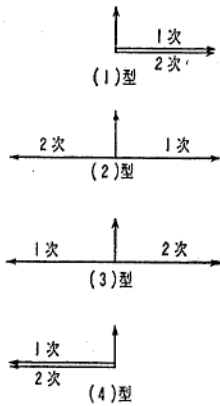


図5 巻線に電流を流す電圧の X 軸成分の型

流は、次のことがらによって拘束され、5種の型に限られてしまう。すなわち、1次、2次巻線に流れる電流によって磁束 ϕ_1, ϕ_2 がつくられ、 ϕ_1, ϕ_2 の合成磁束 ϕ_0 が Y 軸の正方向をむく、ということがらである。図6にその型を示した電流がこの型のどれかをとらなければ、Y軸の正方向に ϕ_0 をつくり得ない。図における電流ベクトルの1次、2次の区別は任意である。

図6の電流の型と、電流を流す電圧の X 軸成分の型とが対応するのであるが、そこには、電流が電圧に対しておくれるか、すすむかの別が加わらなければならない。

図6の(a), (e)は無効電流のみであるのでこれを除くと、対応関係は表3のごとく簡単なものになる。

原回転機のベクトル図は、無効電流のみの場合を除けば、表2, 3によって、12種あることになる。目的に応じてその一つを選び、図6を参考にすれば求めるベクトル図を画くことができる。

4. 原回転機のベクトル図の例

まず、最も一般的であるところの、1次おくれ、2次おくれ電流の場合のベクトル図を示し、このベクトル図による原回転機の特性方程式を導くことにする。図7に示したベクトル図は、表2, 3, および図6の、(ロ), (3), (b)型によるものであるが、この図より導きだされた特性方程式は、1次おくれ、2次おくれ電流の場合の、ほとんど

表2

巻線に誘起される電圧の型	(イ)	(ロ)
1次入力 2次入力	(4)	(3)
1次出力 2次出力	(3)	(4)
1次出力 2次入力	(2)	(1)
1次出力 2次出力	(1)	(2)

巻線に電流を流す電圧の X 軸成分は、巻線が入力の場合は、巻線に誘起される電圧と等大、反対方向であり、出力のときは、等大、同方向である。したがって、巻線に誘起される電圧の型が、(イ)であっても、(ロ)であっても、電流を流す電圧の X 軸成分の型は、図5のごとく4種存在する、この4種の型に、1次、2次が、入力であるか、あるいは出力であるかの区別が加わって、巻線に誘起される電圧の型の、(イ)、あるいは(ロ)が対応する。この対応関係を表2に示す。

4) 巻線に流れる電流の型

巻線に流れる電

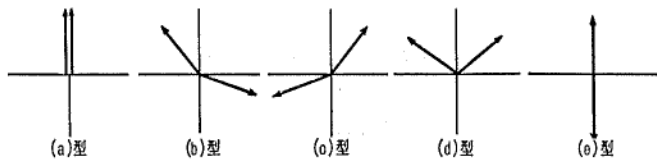


図6 巻線に流れる電流の型

表3

巻線に電流を流す電圧の X 軸成分の型	(1)	(2)	(3)	(4)
電流の おす くす れみ	1次おくれ 2次おくれ		(b)	(b)
	1次おくれ 2次すすみ			(d)
おす くす れみ	1次すすみ 2次おくれ		(d)	
	1次すすみ 2次すすみ		(c)	(c)

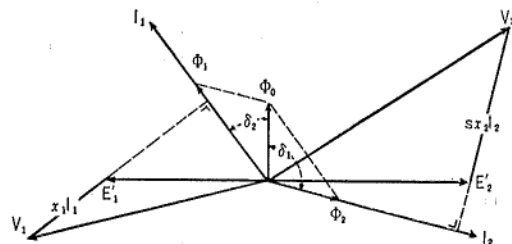


図7

すべてに適用できるものであることがわかったので、この図による計算を示す。

V_1, V_2 は端子電圧, I_1, I_2 は電流, ϕ_1, ϕ_2 は I_1, I_2 によってつくられる磁束, E'_1, E'_2 は ϕ_1, ϕ_2 の合成磁束 ϕ_0 の回転によって誘起される実在電圧, ただし図の場合は, 1次, 2次共入力であるから, 1次, 2次共対抗する電圧で示してある. ω_1, ω_2 は電源の角速度を ω_1 としたときの巻線のもれリアクタンス, ω_1, ω_2 は電源の角速度 δ_1 は ϕ_0, ϕ_2 間の角, δ_2 は ϕ_0, ϕ_1 間の角である. なお, $s = -\frac{\omega_2}{\omega_1}$ である.

以下の計算は, このベクトル図による.

5. 1次, 2次, および機械的入力におけるエネルギー分担

P_1, P_2, P_3 がどのような比に配分されるかを計算するのである. 入出力は相あたりとする.

$$\phi_0 = \phi_1 \cos \delta_2 + \phi_2 \cos \delta_1 \quad (3)$$

α_1, α_2 を巻線の係数とし,

$$\phi_1 = \alpha_1 I_1 \quad \phi_2 = \alpha_2 I_2 \quad (4)$$

とすると,

$$\phi_0 = \alpha_1 I_1 \cos \delta_2 + \alpha_2 I_2 \cos \delta_1 \quad (5)$$

また,

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= I_1 E'_1 \sin \delta_2 \\ P_2 &= I_2 E'_2 \sin \delta_1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\phi_1 \sin \delta_2 = \phi_2 \sin \delta_1 \quad (7)$$

(4), (7) より,

$$I_1 = \frac{\alpha_2 \sin \delta_1}{\alpha_1 \sin \delta_2} I_2 \quad I_2 = \frac{\alpha_1 \sin \delta_2}{\alpha_2 \sin \delta_1} I_1 \quad (8)$$

k_1, k_2 を回転磁界の角速度 ω_1 のときの, 巻線の誘起電圧の係数とすると,

$$E'_1 = k_1 \phi_0 \quad (9)$$

(5), (6), (8), (9) より,

$$P_1 = I_1^2 \alpha_1 k_1 \frac{\sin \delta_2}{\sin \delta_1} \sin(\delta_1 + \delta_2) = I_2^2 \alpha_2 k_2 \frac{\sin \delta_1}{\sin \delta_2} \sin(\delta_1 + \delta_2) \quad (10)$$

ここで, $s = -\frac{\omega_2}{\omega_1}$ なる s を定義する. s は誘導機のすべりではなく, 単なる比であるが, この s を誘導機に適用すると, 従来のすべりと同意になる. そこでこの s をすべりということもあるが, 本質は単なる比である. すると,

$$E'_2 = s k_2 \phi_0 \quad (11)$$

(5), (6), (8), (11) より,

$$P_2 = s I_1^2 \frac{\alpha_2^2}{\alpha_1^2} k_2 \frac{\sin \delta_2^2}{\sin \delta_1} \sin(\delta_1 + \delta_2) \quad (12)$$

$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{k_1}{k_2}$ であるから, (10), (12) より,

$$P_2 = s P_1 \quad (13)$$

(1), (13) より,

$$P_1 : P_2 : P_3 = 1 : s : -(1+s) \quad (14)$$

(14) が1次, 2次入力, および機械的入力のエネルギー分担の関係である.

この s は、磁界と軸の回転の型によって定まる。たとえば誘導電動機の場合は、表1をみると、(A)型であるから s は負であって P_2 は負となり、 $\omega_2 < \omega_1$ より $(1+s)$ は正となって P_3 も負となる。つまり回転子巻線は出力となって電力を食ひ、機械的出力が軸から外部に出る、というわけである。なお、誘導電動機の場合、 $-s$ が従来の意味のすべりとなる。

6. 機械的出力、およびトルク

(10), (14) より,

$$P_3 = -(1+s)I_1^2\alpha_1k_1 \frac{\sin \delta_2}{\sin \delta_1} \sin(\delta_1 + \delta_2) = -(1+s)I_2^2\alpha_2k_2 \frac{\sin \delta_1}{\sin \delta_2} \sin(\delta_1 + \delta_2) \quad (15)$$

機械的出力は P_3 の負号をとったものにほかならない。

(15)のごとく、 P_3 は I_1 によっても、 I_2 によってもあらわされる。これを V_1, V_2 によってあらわせば、図7より、

$$\left. \begin{aligned} V_1^2 &= I_1^2 A_1 \\ V_2^2 &= s^2 I_2^2 A_2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$A_1 = \left\{ \alpha_1 k_1 \frac{\sin(\delta_1 + \delta_2)}{\sin \delta_1} \right\}^2 + x_1^2 + 2x_1 \alpha_1 k_1 \frac{\cos \delta_2 \sin(\delta_1 + \delta_2)}{\sin \delta_1}$$

$$A_2 = \left\{ \alpha_2 k_2 \frac{\sin(\delta_1 + \delta_2)}{\sin \delta_2} \right\}^2 + x_2^2 - 2x_2 \alpha_2 k_2 \frac{\cos \delta_1 \sin(\delta_1 + \delta_2)}{\sin \delta_2}$$

となるから、(16)より I_1^2, I_2^2 を求め、これを(15)に入れたものとなる。

次に、機械的トルクを τ とすると、 $\tau = \frac{P_3}{\omega_3}$ であるから(15)より、

$$\tau = \frac{-I_1^2 \alpha_1 k_1 \sin \delta_2}{\omega_1 \sin \delta_1} \sin(\delta_1 + \delta_2) = \frac{s I_2^2 \alpha_2 k_2 \sin \delta_1}{\omega_2 \sin \delta_2} \sin(\delta_1 + \delta_2) \quad (17)$$

などがでる。また、(5), (8)を用いれば、

$$\tau = \frac{-k_2}{\omega_1} \sin \delta_1 \phi_0 I_2 = \frac{s k_1}{\omega_2} \sin \delta_2 \phi_0 I_1 \quad (18)$$

などがでる。

7. 負荷角、および電機子反作用

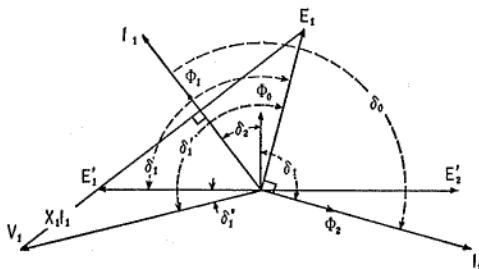


図 8

図8は図7のベクトル図を、1次側を主として書き、角に符号をつけたものである。符号の説明は、特に必要と思われるもののみにとどめる。

負荷角とは、たとえば1次側についていえば、1次の誘起電圧は2次磁束の回転によって誘起されるものである、という考え方をするために必要になるのである。そうして、もし、1次に電流が流れるならば、この電流によって2次磁束が変

化し、この変化した2次磁束の回転によって1次に電圧が誘起される、と考えるのである。この考え方を処理するために、負荷角という概念が必要になる。変化には、角のずれと大きさとの二つがあるので、処理にはもう一つの概念が必要になり、それが電機子反作用等価リアクタンスである。

原回転機の理論においては、巻線に電圧を誘起する回転磁束は、1次、1次磁束の合成磁束であるという考え方をとっている。この合成磁束が図8の ϕ_0 である。しかし、 ϕ_0 を1次側からみれば

ば、 ϕ_2 が I_1 によって変化したものともみることできる。変化しただれ角が1次側からみた負荷角で、図8の δ_1 である。また $\overline{E_1 E_1'}$ が1次側からみた電機子反作用等価リアクタンス降下である。ベクトル E_1 は仮想誘起電圧といわれているもので、 ϕ_2 の回転のみによって誘起されるものと仮定されたものである。 E_1 は I_2 に垂直である。2次側についても同様なことがいえ、2次側からみた負荷角、および電機子反作用等価リアクタンスという概念がつけられる。

通常、 V_1 と E_1 の角 δ_1' を、1次側からみて負荷角といっている。すると、

$$P_1 = \frac{V_1 E_1}{(x_1 + x_1')} \sin \delta_1'$$

となる。ただし、 x_1' は1次側からみた電機子反作用等価リアクタンスである。

しかし、

$$P_1 = \frac{V_1 E_1}{(x_1 + x_1')} \sin \delta_1' = \frac{V_1 E_1'}{x_1} \sin \delta_1'' = \frac{E_1' E_1}{x_1'} \sin \delta_1 \tag{19}$$

であるから、1次側からみた負荷角を、 δ_1 , δ_1' , δ_1'' のいずれとしてもよいわけである。

2次側についても同様なことがいえ、

$$P_2 = \frac{V_2 E_2}{s(x_2 + x_2')} \sin \delta_2' = \frac{V_2 E_2'}{s x_2} \sin \delta_2'' = \frac{E_2' E_2}{s x_2'} \sin \delta_2 \tag{20}$$

となる。

(14) を用いて、

$$P_a = -(1+s) \frac{V_1 E_1}{(x_1 + x_1')} \sin \delta_1' = -(1+s) \frac{V_2 E_2}{(x_2 + x_2')} \sin \delta_2' \tag{21}$$

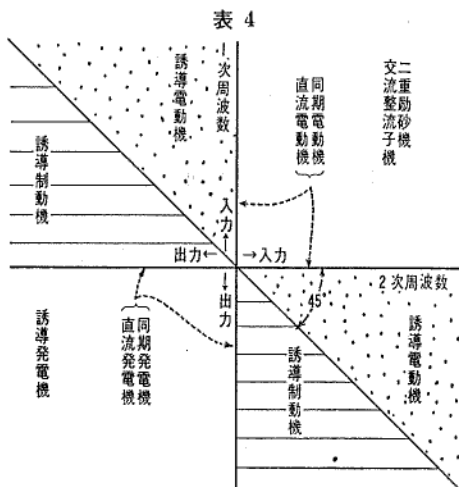
等がだされる。

また図8から次の式が計算される。

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{k_1}{\alpha_1} \phi_1 \phi_2 \sin \delta_0 \\ P_2 &= s \frac{k_2}{\alpha_2} \phi_1 \phi_2 \sin \delta_0 \end{aligned} \right\} \tag{22}$$

(22) は (7), (8), (10) よりだすこともできる。

8. 原回転機よりみた現存機種、および未開発機種



原回転機は回転機の一般形態なので、現存機種が原回転機の特種形態としてどのような位置に属しているかを、現存機種の一部をとって表4に示した。縦軸、横軸は、1次、2次の周波数、正方向は入力を、負方向は出力を示してある。

未開発機の一部をあげると、二重励磁機では f_1 , f_2 (1次、2次周波数) がおのおの可変なもの、誘導機では f_1 , f_2 がおのおの負荷に拘束されるもの、直流機では f_1 あるいは f_2 が負荷に拘束されるもの、などが考えられる。

9. 原回転機理論の現存機種への適用例

1) 同期電動機の場合

この場合 ϕ_2 は界磁といわれるものであるが、これも $f_2 \rightarrow 0$ の極限によってつくられた回転磁界と考える。すると $s = 0$, よって $E'_1 = 0$ となり、ベクトル図は (3), (d) の (イ), あるいは (ロ) となり、いずれにしても図 9 のごとくなる。図においては、1 次巻線に抵抗をつけておいた。負荷角は図の δ'_1 であり、電機子反作用等価リアクタンス降下は $\overline{E_1 E'_1}$ であり、

いずれも従来のものと一致する。抵抗を無視したときの機械的出力は、(21) に $s = 0$ をいれて、

$$P_3 = -\frac{V_1 E_1}{(x_1 + x'_1)} \sin \delta'_1$$

と、従来のものになる。

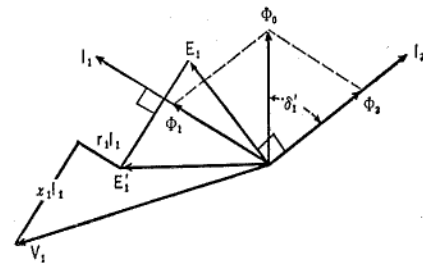


図 9

2) 誘導電動機の場合

この場合ベクトル図は (3), (b) の (イ) と、図 10 のごとくなる。図には巻線に抵抗をつけておいた。1 次側からみた負荷角は図 11 の δ'_1 であり、電機子反作用等価リアクタンス降下は $\overline{E_1 E'_1}$ なのである。しかし、誘導電動機における従来の考え方によると、 ϕ_0 をつくる励磁電流 I_0 は分岐し、かつほぼ不変であって、1 次負荷電流と区別され、別ものとされている。1 次負荷電流は I_2 と反対方向で、図 11 における I'_1 とされている。そこでもし、 I'_1 について電機子反作用等価リアクタンス降下を考えるとすれば、このときの E_1 は図 11 のごとく無限大になってしまう、等価リアクタンス降下という概念は意味がつかめなくなってしまう。こうなるため誘導電動機においては電機子作用等価リアクタンスという概念はないのであろうと考える。励磁電流が分岐するときの電機子反作用については、まだ考えていない。しかし、負荷角という概念は用いてよいと考える。

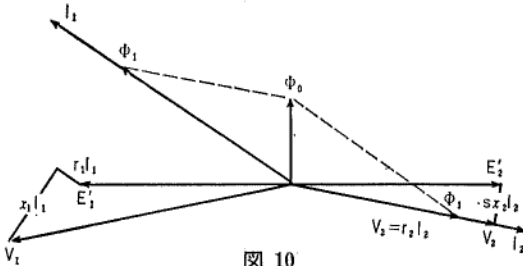


図 10

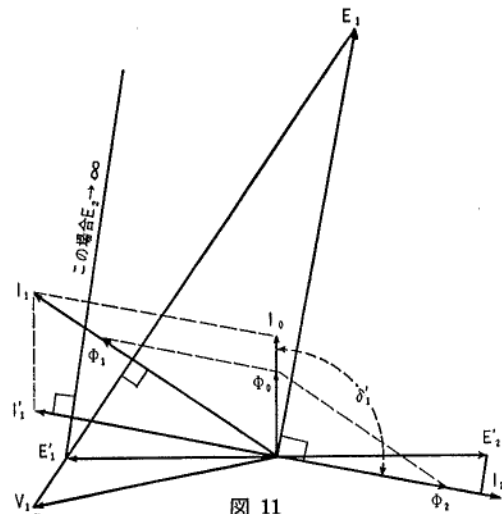


図 11

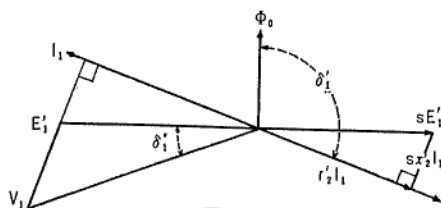


図 12

図 12 は従来の考え方によったベクトル図である。1 次側からみた負荷角は δ'_1 である。(19) により δ''_1 も負荷角といてよいことにすると、機械的出力 P_3 は、

$$P_3 = -(1+s) \frac{V_1 E'_1}{x_1} \sin \delta''_1 \quad (23)$$

図 (12) によって (23) を計算しなおすと、

$$P_3 = \frac{V_1^2(1+s)r_2'}{r_2' + s^2(x_1 + x_2)'} \quad (24)$$

(24) は、従来の方法によって誘導電動機の機械的出力を計算したものと同一である。ただし、誘導電動機の場合、 S は負であり、(24) の P_3 は入力 の形をとってある。 r_2', x_2' は r_2, x_2 を1次側に換算したものである。

10 結 言

以上が原回転機の定常状態についての第一報告である。この報告の中にある誘導機においての負荷角という概念については、2, 3の実験結果によっても、用いてよいということは、ほぼまちがいないと考えているが、さらに本格的な実験を企て、解析を進めている。

終りに本研究ならびに実験のため、ご指導とご協力を賜わった、室蘭工業大学図所先生、伊達先生、近藤先生に深く謝意を表します。

文 献

- 藤田義弘, 近藤 修, 伊達隆三, 図所忠則 (1967) 同期機と非同期機の共通性, 原回転機 の特性及び他機種との関係, 電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, 1 の 32, 33.
- 藤田義弘, 近藤 修, 伊達隆三, 図所忠則 (1968) 原回転機よりみた一般回転機の統一理論解 析, 電気四学会連合大会講演論文集, 518 頁.
- 藤田義弘, 図所忠則 (1968) 原回転機の負荷角と機械的出力, 電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, 1 の 49.
- 藤田義弘, 近藤 修, 図所忠則, 伊達隆三 (1969) 原回転機よりみる同期機と誘導機の 関係について, 原回転機よりみる同期機と直流機の関係について, 電気四学会連合大会講演論文集, 682, 683 頁.
- 藤田義弘, 図所忠則 (1969) 原回転機のベクトル図と等価回路, ベクトル図よりみた原 回転機の負荷角と電機子反作用, 電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, 47, 48 頁.
- 藤田義弘, 山崎永一, 近藤 修, 伊達隆三, 図所忠則 (1969) 同期機と誘導機の相似性その 1, その 2, 電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, 52, 53.
- 藤田義弘, 近藤 修, 伊達隆三, 図所忠則 (1970) 誘導機のすべりと負荷角との相似性 に関する理論とその実験, 電気四学会連合大会講演論文集, 486.
- 藤田義弘, 山崎永一, 伊達隆三, 近藤 修, 図所忠則 (1970) 誘導機と同期機両機の円線 図よりみる相似性について, 電気四学会北海道支部連合大会論文集 (印刷中).